

Modélisation de nappes surfaciques de courants « Foudre » : formulation analytique et validation expérimentale

D. Cvetkovic^(1,2,3), S. Lalléchère⁽¹⁾, V. Melchor⁽¹⁾, L. Pniak⁽¹⁾, Y. Corredores⁽⁴⁾, F. De Daran⁽¹⁾, P-E. Lévy⁽²⁾, L. Pichon⁽³⁾

⁽¹⁾ Safran Tech, Rue des jeunes Bois, 78117 Châteaufort, France

⁽²⁾ ENS Paris Saclay, 4 avenue des sciences, 91190 Gif-sur-Yvette, France

⁽³⁾ GeePs - CentraleSupélec, CNRS, Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, Gif-sur Yvette, France

⁽⁴⁾ Safran Electronics and Defense, 86280 Saint-Benoît, France

E-mail: danica.cvetkovic@safrangroup.com

Résumé : Cette étude présente une approche novatrice basée sur la méthode PEEC (Partial Element Equivalent Circuit) et l'intégration analytique de ses équations de couplage. L'accent est mis sur l'implémentation d'un formalisme surfacique, désigné ici sous le nom de S-PEEC (Surface-PEEC). Les principes théoriques sont exposés et confirmés par des essais expérimentaux sur une maquette planaire. La comparaison entre la cartographie des valeurs de courant mesuré et celles issues de la simulation avec la formulation S-PEEC confirme la validité de la méthodologie proposée.

I. INTRODUCTION

Le foudroiement des aéronefs est un phénomène qui, par nature, reste imprévisible et inévitable : en moyenne, les appareils sont foudroyés toutes les 1500 heures à 5000 heures de vol (soit environ une fois par an) [1]. La compréhension de ces impacts est importante pour la mise en place de stratégies de conception et des systèmes de protection adéquats afin d'assurer la sécurité et la fiabilité des avions face à cette menace naturelle. Dans cette optique, l'utilisation d'outils de simulation, tels que les Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD), la Méthode des Moments (MoM) et les Éléments Finis (FE), ainsi que la combinaison de ces approches, est essentielle pour évaluer les effets de la foudre. Parmi ces méthodes, nous nous intéressons particulièrement à l'approche PEEC. Cette méthode dans son formalisme analytique se révèle prometteuse pour modéliser et analyser les interactions électromagnétiques induites par la foudre sur la structure d'un aéronef. Contrairement au formalisme classique PEEC, où les équations intégrales (EFIE) sont résolues numériquement [2], notre approche utilise une résolution analytique [3], offrant des avantages notables en termes de temps de calcul et de ressources informatiques. L'aspect novateur porte sur la géométrie et sur l'orientation des éléments rectangulaires, qui ne sont plus strictement contraints à une disposition parallèle ou orthogonale.

Ce document présente la méthodologie de résolution analytique en considérant l'orientation variable des éléments rectangulaires, avec une comparaison entre les valeurs simulées et les mesures expérimentales.

II. APPROCHE NUMERIQUE

A. Principe théorique

Le formalisme PEEC « classique » (voir notamment [4]) est utilisé. L'expression du potentiel vecteur $\vec{A}_1(\vec{r})$, est utilisé dans l'équation (1) - sous forme surfacique - avec $\vec{\sigma}_1$ la densité surfacique de courant sur le conducteur 1, et \vec{r} et \vec{r}_1 représentent respectivement une position générique dans l'espace et la localisation du conducteur 1. Fig.1a :

$$\vec{A}_1(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{S_1} \frac{\vec{\sigma}_1}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} dS_1 \quad (1)$$

En substituant l'équation (1) dans la relation définissant l'inductance mutuelle partielle entre deux plaques [5], nous dérivons l'expression (2), qui généralise le calcul de l'inductance partielle entre deux conducteurs 1 et 2 :

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi \cdot S_1 \cdot S_2} \iint_{S_1} \iint_{S_2} \frac{1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|} dS_1 dS_2 \quad (2)$$

où $S_{1/2}$ sont les surfaces associées aux conducteurs respectifs 1 et 2 (voir Fig. 1). Comme observé, le calcul des inductances mutuelles partielles implique des intégrations successives de la fonction de distance. Dans la littérature, le calcul analytique de la relation (2) peut être complexe voire impossible. Cet article présente une méthodologie offrant un calcul analytique de l'équation (2), dont les étapes seront détaillées dans la section suivante.

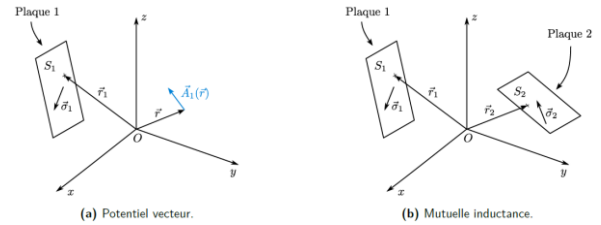


Fig. 1. (a) Vue d'une plaque et du potentiel vecteur exercé. (b) Système de cellules élémentaires (plaques 1 et 2) et mutuelle inductance entre elles.

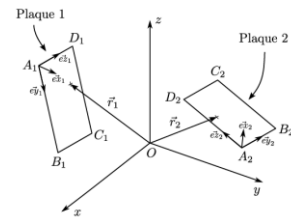


Fig. 2. Vue de deux cellules élémentaires (plaques rectangulaires 1 et 2) associées avec leurs repères propres (A1, A2).

B. Méthodologie

A partir de la définition du modèle numérique de l'objet sous test (OST) considéré, la méthodologie proposée dans ces travaux s'articule autour des étapes suivantes :

- Maillage de l'OST de sorte à obtenir une collection de cellules élémentaires (CE) rectangulaires (plaques).
- Association des repères A1 et A2 (voir les Figures 1 et 2) à chaque paire de cellules (CE) en alignant les axes avec les directions des arêtes des cellules

élémentaires (deux plaques rectangulaires) pour former un repère orthogonal.

- Calcul analytique par une méthode PEEC analytique, de la résistance et des couplages inductifs associés à chaque cellule (CE) de sorte à obtenir une matrice résistance, inductance et mutuelle inductance partielle de l'OST considéré.
- Détermination de la matrice impédance du système.
- Définition des sources de tension et/ou courant, et résolution numérique dans le domaine temporel du circuit électrique équivalent formé par les CE.

Cette méthodologie assure une résolution instantanée, y compris dans le domaine temporel, se démarquant ainsi de la résolution numérique « classique ».

III. RESULTATS NUMERIQUES ET COMPARAISON AVEC L'EXPERIENCE

Le cas test proposé dans ce papier s'appuie sur une maquette surfacique réalisée à Safran Tech et permettant d'injecter un courant foudre selon les standards décrit dans la référence [6]. La Figure 3a donne une vue du dispositif expérimental utilisé permettant de :

- Définir l'OST : maquette en cuivre constituée de deux plaques de 200mm x 300mm séparée par une ouverture de 45mm et une connexion mobile (voir Figure 3b),
- Mesurer le courant foudre injecté sur un câble,
- Mesurer les courants à la surface de la maquette métallique.

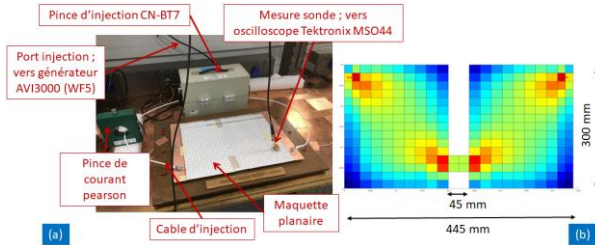


Fig. 3. (a) Vue du dispositif expérimental « Foudre » proposé. (b) Cartographie des courants simulés (valeur crête) et maillage en CE.

La Figure 3b donne également une illustration de la facetisation de l'objet (étape de maillage) sous test (maquette planaire métallique) avec une vue de l'entrée ('in' en haut à droite) et de la sortie ('out' en haut à gauche) du courant foudre propagé sur la structure.

La Figure 4 donne une vue des composantes cartésiennes des courants surfaciques mesurés (en noir) et simulés (en bleu) à l'aide du code de calcul S-PEEC (Surface-PEEC) développé par Safran Tech [5]. On constate un très bon accord entre les mesures et les simulations S-PEEC. Les données sont normalisées aux niveaux des courants injectés ; une forme d'onde WF5 définie par la norme DO-160 est utilisée [6]. Les mesures et simulations sont réalisées dans le domaine temporel. Les courants maximums mesurés et/ou simulés durant les essais sont représentés vectoriellement sur la Figure 4 et en amplitude sur la Figure 5.

La Figure 5 quantifie l'écart existant entre les données mesurées (axe des ordonnées et diagonale en noir) et les simulations (axe des abscisses en bleu). La proposition

d'une marge (zone en bleu clair sur la Figure 5) de +/-6dB permet de quantifier la bonne concordance des résultats obtenus : 95% des données simulées sont situées dans la zone « margée ».

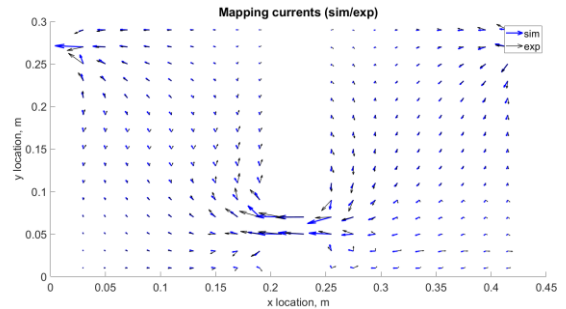


Fig. 4. Cartographie des courants normalisés (au niveau d'injection réalisé) comprenant : les simulations S-PEEC (bleu) et les mesures (noir).

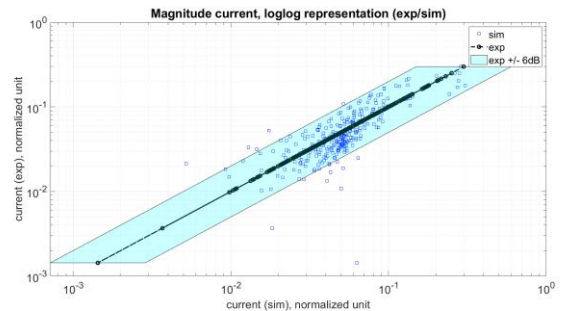


Fig. 5. Confrontation des valeurs mesurées (en noir) VS simulations S-PEEC (en bleu) des courants normalisés. La surface bleue proposée délimite une marge de +/- 6dB autour des valeurs mesurées (en noir).

IV. CONCLUSION

Le papier proposé a permis de valider l'utilisation d'un outil de calcul des nappes surfaciques de courant « foudre » à travers la réalisation de mesures sur une maquette commune (géométrie, matériau) aux parties expérimentale et numérique. Les développements actuels comprennent la validation de l'outil développé sur des structures plus complexes (dimensions, formes), incluant la modélisation des harnais et des équipements (interfaces).

REFERENCES

- [1] A. Fay, A. Bigand, "Airbus lightning in service experience vs lightning zoning", *International Conference on Lightning and Static Electricity*, Toulouse, France, 2015.
- [2] M. Bandinelli *et al.*, "A Surface PEEC Formulation for High-Fidelity Analysis of the Current Return Networks in Composite Aircrafts", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, n° 5, 2015.
- [3] L. Pniak, Y. Corredores, P.-E. Lévy, S. Lallechère, et F. de Daran, "Formulation analytique du calcul des courants foudre pour des applications aéronautiques", *21^{ème} Colloque international et Exposition sur la Compatibilité ElectroMagnétique*, Toulouse, France, 2023.
- [4] A. E. Ruehli, "Inductance Calculations in a Complex Integrated Circuit Environment," in *IBM Journal of Research and Development*, vol. 16, Issue 5, pp. 470 – 481, Sept. 1972.
- [5] Y. Corredores, L. Pniak, P.-E. Lévy, S. Lallechère, F. De Daran, Determination of Lightning Induced Effects in Aeronautic Systems by Analytical Formulation, in Proc. ICOLSE 2022, Madrid, Spain, september 2022.
- [6] RTCA DO-160, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, Section 22 & 23, 2014.